

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ШИРЯЄВА НАТАЛЯ ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 539.3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ТА
ДОВГОВІЧНОСТІ ЛОПАТЕЙ ТА ЛОПАТОК
ПАРОВИХ І ВІТРОВИХ ТУРБІН

Спеціальність 05.02.09 - динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі систем та процесів управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бреславський Дмитро Васильович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
декан інженерно-фізичного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Воробйов Юрій Сергійович,
ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України,
керівник відділу нестационарних
механічних процесів

доктор технічних наук, професор
Данішевський Владислав Валентинович,
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія
будівництва та архітектури»,
професор кафедри будівельної механіки
та опору матеріалів

Захист відбудеться «05» червня 2013 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «26» квітня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.10



В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення втомної міцності та довговічності лопаток та лопатей турбін потребує проведення фундаментальних та прикладних досліджень у галузі машинобудування. Нелінійні коливання при циклічних навантаженнях суттєво впливають на руйнівний стан елементів турбін за рахунок накопичення втомних пошкоджень при експлуатації, що призводить до зародження і розвитку макроскопічних тріщин, руйнуванню та втрати працездатності.

Аналіз існуючих методів розрахунку нелінійних коливань на підставі різних моделей деформування та методів оцінок довговічності, які враховують процеси втоми різних матеріалів лопаток та лопатей турбін показав, що ці методи знаходяться в стадії постійного вдосконалення. Спроби врахування впливу обертання турбін на коливання лопатей та лопаток, відсутність симетрії їхніх геометричних характеристик, а також значні амплітуди коливань відносяться до проблем нелінійних коливань та втоми, які сформульовані відносно недавно. Сучасні наукові дослідження пов'язані з побудовою моделей динаміки та оцінювання довговічності лопаток та лопатей турбін на підставі підходів, які засновані на прикладній механіці коливань та теорії континуальної пошкоджуваності. Таким чином, необхідність розробки ефективних та вдосконалення існуючих методів розрахунку нелінійних коливань закручених стрижневих систем з метою вивчення закономірностей динамічних процесів та оцінки ресурсу лопаток та лопатей турбін є актуальною науково-практичною задачею, яка визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі систем і процесів управління НТУ "ХПІ" у рамках завдань фундаментальних держбюджетних НДР МОН України "Створення методів аналізу нелінійної динаміки і повзучості деформованих тіл та дискретних систем" (№ Д.Р. 0106U001465) і "Створення методів аналізу нелінійних коливань елементів конструкцій та засобів їх гасіння" (№ Д.Р. 0106U005164), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення чисельно-аналітичних розрахункових методів оцінювання параметрів нелінійних коливань і ресурсу лопаток та лопатей турбін.

Для досягнення мети роботи поставлені наступні завдання:

- проаналізувати стан розробок у напрямку створення розрахункових методів оцінювання нелінійних коливань і ресурсу лопаток та лопатей турбін;
- створити уточнені континуальні моделі згинно-згинно-крутильних нелінійних коливань закручених стрижнів, центри тяжіння та жорсткості поперечних перетинів яких не співпадають;
- із застосуванням методу Бубнова-Гальоркіна розробити дискретні моделі для дослідження нелінійних коливань закручених стрижнів;
- отримати закономірності нелінійних коливань лопаток та лопатей турбін та провести їхній аналіз на основі дослідження динамічних моделей;

- на основі результатів дослідження коливань при геометрично нелінійному деформуванні стрижнів отримати розрахункові оцінки ресурсу робочих лопаток парової турбіни циліндру низького тиску.

Об'єкт дослідження – нелінійні коливання лопаток парових турбін й лопатей вітрових турбін та довговічність закручених лопаток турбомашин.

Предмет дослідження – закономірності динаміки й втомного руйнування лопатей та лопаток парових і вітрових турбін.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи залучено сучасні варіаційні методи механіки, методи нелінійної динаміки. Метод Бубнова-Гальоркіна використано для виведення нелінійних диференціальних рівнянь руху закручених стрижнів. Для розрахунку амплітудно-частотної характеристики вимушених коливань робочої лопатки парової турбіни застосовано метод гармонійного балансу. Нелінійні коливання лопатей вітрової турбіни досліджувалися за допомогою методу багатьох масштабів та методу нелінійних нормальних форм Шоу-П'єра. Кількість циклів до руйнування для лопатки парової турбіни розраховано шляхом застосування методів континуальної механіки пошкоджуваності для оцінки тривалої міцності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- створено нові методи розв'язку прикладних задач аналізу нелінійних згинно-згинно-крутильних коливань закручених стрижнів, які обертаються, що є підґрунтям для уточненої оцінки втомної довговічності лопатей та лопаток парових і вітрових турбін;

- отримало подальший розвиток спільне застосування методу нелінійних нормальних форм коливань Шоу-П'єра та методу багатьох масштабів для розв'язку рівнянь згинно-згинно-крутильних коливань стрижневих моделей лопаток турбомашин;

- запропоновано новий підхід до оцінки ресурсу лопаток турбомашин, заснований на континуальній механіці пошкоджуваності;

- встановлено нові закономірності коливань і довговічності лопатей вітроенергетичних установок та лопаток турбомашин на основі дослідження їхньої динаміки при геометрично нелінійному деформуванні.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудування полягає у розробці методів дослідження нелінійної динаміки лопатей вітроенергетичних установок та робочих лопаток турбомашин. Розроблено метод оцінки довговічності робочих лопаток потужної парової турбіни при багатоциклового навантаженні, який може стати основою вдосконалення конструкцій існуючих та перспективних лопатей та лопаток енергетичних машин.

Результати дисертаційної роботи використані на ВАТ "Турбоатом" (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Усі основні теоретичні і практичні результати роботи отримані здобувачем особисто. Серед них: виведення системи диференціальних рівнянь у частинних похідних для розрахунку нелінійних коливань лопаті вітроенергетичної установки та лопатки

турбомашини; проведення чисельного аналізу нелінійних коливань закручених стрижнів несиметричного поперечного перетину; розрахунок та аналіз поверхонь нелінійних нормальних форм коливань; аналіз поведінки елементів конструкцій при статичному та динамічному навантаженні; розробка методу оцінки довговічності лопаток турбомашин із урахуванням пошкоджень при нелінійних коливаннях.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи докладалися і обговорювалися на: 6-й Всеукраїнській студентській науковій конференції «Прикладна математика та інформатика» (Львів, 2003 р.), 8-й Міжнародній науково-технічній конференції ХНПК “ФЭД” (Харків, 2003), 1-й, 2-й та 3-й Міжнародних конференціях «NONLINEAR DYNAMICS» (Харків, 2004, 2007, 2010 рр.), 11-й Міжнародній науковій конференції ім. академіка М. Кравчука (Київ, 2006 р.), Міжнародній конференції «Rvachev Conference – Актуальні проблеми прикладної математики і механіки» (Харків, 2006 р.), 14-й Міжнародній науковій конференції вчених України, Білорусі, Росії (Севастополь, 2006 р.), V-й міжвузівській науково-практичній конференції «Можливості використання методів механіки для розв’язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» (Харків, 2006 р.), 9-й Міжнародній конференції «Dynamical systems theory and applications» (Лодзь, Польща, 2007 р.), 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності в газотурбобудуванні» (Київ, 2007 р.), Міжнародній конференції «Nonlinear Dynamics of Composite and Smart Structures, Euromech Colloquium 498» (Люблін, Польща, 2008 р.).

Публікації. Основні наукові положення та результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано у 21 науковій праці, серед яких 9 у наукових фахових виданнях України та 12 - у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 187 сторінок, з них 19 рисунків по тексту, 6 таблиць по тексту, 4 рисунки на 6 сторінках, 6 рисунків на 3 окремих сторінках, 210 найменувань використаних джерел на 21 сторінці, 5 додатків на 19 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації. Сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому** розділі проаналізовано стан досліджень в галузі оцінювання нелінійних коливань та довговічності лопаток та лопатей турбін.

Розрахункові схеми лопатей та лопаток енергетичних машин представляються закрученими стрижнями, поведінка яких вивчається в умовах динамічного навантаження. Теорія коливань стрижневих систем – один з найбільш поширених й розвинутих розділів прикладної механіки коливань, великий внесок до якої зроблено до цього часу вітчизняними й зарубіжними

вченими. Рівняння лінійних коливань стрижнів з несиметричним поперечним перетином були отримані С.П. Тимошенко, А.П. Філіповим. Моделі закручених стрижнів несиметричного поперечного перетину розвинуто в роботах Ю.С. Воробйова, В.І. Гуляєва, В.В. Гайдайчука, Г.Ю. Джанелідзе, А.І. Лурье, П.М. Різа, Б.Ф. Шорра. Подальший розвиток цих моделей надано в роботах M.R.M. Crespo da Silva, E. Documaci, E.H. Dowell, D.H. Hodges, P. P. Friedmann, C.C. Glynn. К.В. Аврамов, П.С. Ковальчук, Т.С. Краснопольська, В.Д. Кубенко, Ю.О. Митропольський, Г.С. Писаренко, М. Amabili, F. Pellicano, G. Rega, A. Steindl, H. Troger досліджували нелінійні коливання, застосовуючи у своїх роботах методи, що дозволяють промодельовувати процеси звичайними диференціальними рівняннями. Дослідженням нелінійних систем за допомогою нормальних форм коливань займалися Л.І. Маневич, Ю.В. Міхлін, В.М. Пилипчук, С. Chin, А.Н. Nayfeh, E. Pesheck, C. Pierre, S.W. Shaw, A. Vakakis. Вопросы оцінки довговічності циклічно навантажених елементів конструкцій, в тому числі лопаток і лопатей, займалися Б.О. Грязнов, О.С. Гусев, В.В. Матвеев, С.І. Ратнер, В.Т. Трощенко, J.-L. Chaboche, J. Lemaitre, G. Ohgi, G. Sines та інші.

Відзначимо, що на теперішній час потребують подальшого розвитку методи оцінювання динаміки лопатей та лопаток турбін з урахуванням помірних прогинів, а також методи оцінювання тривалої міцності та довговічності конструктивних елементів, побудовані на основі уточнених динамічних моделей та континуальної механіки пошкоджуваності.

У **другому** розділі виведено рівняння руху в частинних похідних, що описують нелінійні згинно-згинно-крутильні коливання закручених стрижнів, які обертаються, довільного поперечного перетину, в припущенні, що центри тяжіння і жорсткості поперечного перетину знаходяться в різних точках.

У основу створеного в роботі методу досліджень покладено розрахункову схему лопатки, що відповідає закрученим стрижням, які деформуються при динамічному навантаженні. Для опису елемента стрижня до та після деформації вводиться дві прямокутні системи координат : нерухома (x, y, z) та рухлива (ξ, η, ζ) . Дослідження коливань поперечного перетину зводиться до аналізу руху системи (ξ, η, ζ) відносно нерухомої системи (x, y, z) .

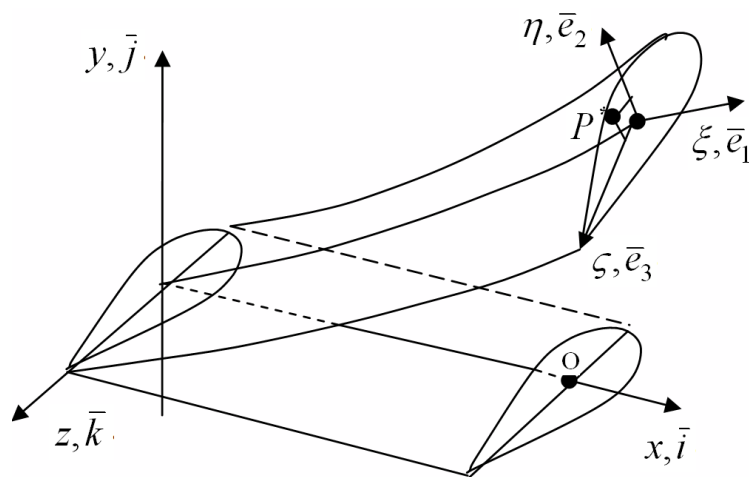


Рис.1. Елемент стрижня до та після деформування

Для обліку переміщень, сумірних із товщиною стрижня як міра деформацій в роботі використовується тензор деформацій Лагранжа-Гріна з урахуванням того факту, що деформації є малими, а переміщення - помірними. Для опису деформаційного стану стрижнів використана гіпотеза плоских перетинів.

Для виведення рівнянь руху стрижнів довільного поперечного перетину застосовано варіаційний принцип Остроградського-Гамільтона.

Диференціальні рівняння нелінійних коливань в частинних похідних відносно переміщень для рівномірно закручених стрижнів з урахуванням неспівпадіння центрів тяжіння і жорсткості мають вигляд:

$$\begin{aligned}
& E \frac{J_\zeta - J_\eta}{2} (w'' \sin 2\alpha)'' + EJ_\zeta (v'' \cos^2 \alpha)'' + EJ_\eta (v'' \sin^2 \alpha)'' + m\ddot{v} - \\
& - m e \ddot{\theta}_x \sin \alpha + \Omega m (2\dot{v} + \Omega x) v' + m \Omega (e \theta_x \sin \alpha - v)'' \left(2 \int_x^L \dot{v} dx + \Omega \frac{L^2 - x^2}{2} \right) - \\
& - em \Omega (\theta_x \sin \alpha)' (4\dot{v} + \Omega x) + em \Omega \theta_x \sin \alpha (\Omega - 2\dot{v}') - \Omega^2 m v + \\
& + \frac{4\Omega^2 m^2}{EA} \int_0^x dx_1 \int_{x_1}^L \ddot{v} d\tilde{x} - 2\Omega m \int_0^x (v' \dot{v}' + w' \dot{w}') dx - 2\Omega m e \int_0^x \frac{\partial}{\partial t} (\theta_x v'' \sin \alpha - \\
& - \theta_x w'' \cos \alpha) dx + E (J_\zeta - J_\eta) (\theta_x w'' \cos 2\alpha)'' - E (J_\zeta - J_\eta) (\theta_x v'' \sin 2\alpha)'' = 0; \\
& EJ_\zeta (w'' \sin^2 \alpha)'' + EJ_\eta (w'' \cos^2 \alpha)'' + E \frac{J_\zeta - J_\eta}{2} (v'' \sin 2\alpha)'' + m\ddot{w} + \\
& + m \ddot{\theta}_x e \cos \alpha + \Omega m (2\dot{v} + \Omega x) w' - m \Omega (w + e \theta_x \cos \alpha)'' \left(2 \int_x^L \dot{v} dx + \Omega \frac{L^2 - x^2}{2} \right) + (1) \\
& + em \Omega (\theta_x \cos \alpha)' (4\dot{v} + \Omega x) + 2\Omega em \theta_x \dot{v}' \cos \alpha + \\
& + E (J_\zeta - J_\eta) (\theta_x v'' \cos 2\alpha)'' + E (J_\zeta - J_\eta) (\theta_x w'' \sin 2\alpha)'' = 0; \\
& - G (e^2 A + J_\zeta + J_\eta) \theta_x'' - em \ddot{v} \sin \alpha + em \ddot{w} \cos \alpha + \ddot{\theta}_x [m e^2 + \rho (J_\zeta + J_\eta)] + \\
& + m \Omega e (v'' \sin \alpha - w'' \cos \alpha) \left(2 \int_x^L \dot{v} dx + \Omega \frac{L^2 - x^2}{2} \right) + \Omega^2 x m e (w' \cos \alpha - v' \sin \alpha) + \\
& + \Omega^2 \left[v e m \sin \alpha + \rho \frac{J_\zeta - J_\eta}{2} \sin 2\alpha \right] + E \frac{J_\zeta - J_\eta}{2} \sin(2\alpha) (w''^2 - v''^2) + \\
& + E (J_\zeta - J_\eta) \cos(2\alpha) v'' w'' = 0,
\end{aligned}$$

де J_ζ , J_η - моменти інерції, u, v, w, θ_x - узагальнені переміщення стрижня, α - кут закручення стрижня, e - відстань між центрами жорсткості та тяжіння поперечного перетину стрижня.

Використовуючи отриману систему рівнянь, в роботі досліджено власні частоти і форми вільних коливань закручених стрижнів. Застосовуючи граничні умови, $W(0) = W'(0) = \theta(0) = 0$, $W'''(L) = W''(L) = \theta'(L) = 0$, аналітично виведено власні форми коливань стрижня довільного поперечного перетину:

$$\begin{aligned}
W_j = & -\frac{\Delta_1 s_2 + \Delta_2}{\bar{\delta} s_1} \operatorname{sh}\left(\frac{s_1 x}{L}\right) + \chi_1 (s_2^4 - \lambda_B) \operatorname{ch}\left(\frac{s_1 x}{L}\right) + \frac{\Delta_1}{\bar{\delta}} \sin\left(\frac{s_2 x}{L}\right) - \frac{\chi_2}{s_2} \cos\left(\frac{s_2 x}{L}\right) + \\
& + (s_1^4 - s_2^4) (s_2^4 - \lambda_B) \frac{\chi_3}{s_3} \cos\left(\frac{s_3 x}{L}\right) + \frac{\Delta_2}{\bar{\delta} s_3} \sin\left(\frac{s_3 x}{L}\right); \\
\theta_j = & -\frac{(s_1^4 - \lambda_B) (\Delta_1 s_2 + \Delta_2)}{\lambda_B \bar{\delta} s_1} \operatorname{sh}\left(\frac{s_1 x}{L}\right) + \frac{1}{\lambda_B} (s_2^4 - \lambda_B) (s_1^4 - \lambda_B) \chi_1 \operatorname{ch}\left(\frac{s_1 x}{L}\right) - \\
& - \frac{\chi_2 (s_2^4 - \lambda_B)}{\lambda_B s_2} \cos\left(\frac{s_2 x}{L}\right) + \frac{\Delta_1}{\lambda_B \bar{\delta}} (s_2^4 - \lambda_B) \sin\left(\frac{s_2 x}{L}\right) + \eta^{(1)2} (s_1^4 - s_2^4) (s_2^4 - \lambda_B) \cos\left(\frac{s_3 x}{L}\right) + \\
& + \frac{\Delta_2 \eta^{(1)2}}{\chi_3 \bar{\delta}} \sin\left(\frac{s_3 x}{L}\right),
\end{aligned} \tag{2}$$

де j – номер форми коливань, $s_i = \sqrt{\left| a_i - \frac{1}{3} \alpha \lambda_T \right|}$, ($i=1,2,3$), $\lambda_T = \frac{\omega^2 m L^4 r^2}{D_\xi^{(1)}}$, $r = \sqrt{\frac{I_\xi}{m}}$,

$$\alpha = 1 + \frac{\eta^{(1)2}}{r^2}, \quad a_i = 2 \sqrt{\frac{P}{3}} \cos\left(\frac{\Phi}{3} + (i-1) \frac{2\pi}{3}\right), \quad \cos\Phi = \frac{3\sqrt{3}Q}{2P\sqrt{-P}}.$$

Інші параметри (2) не наведено для стислості викладу.

В роботі досліджені лопаті вітрової турбіни з поперечним перетином, симетричним відносно осі абсцис (рис. 2).

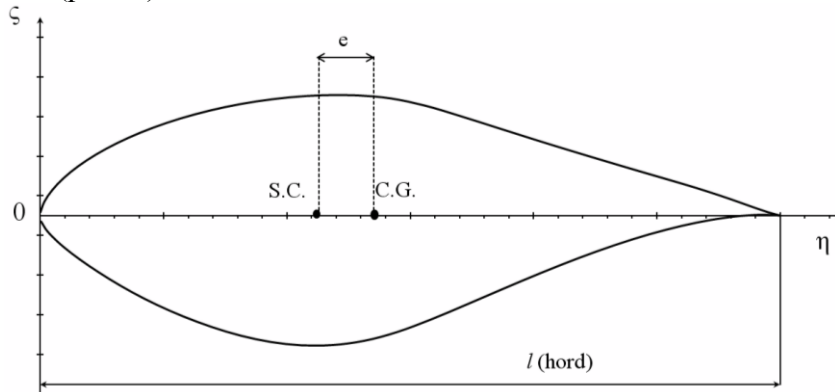
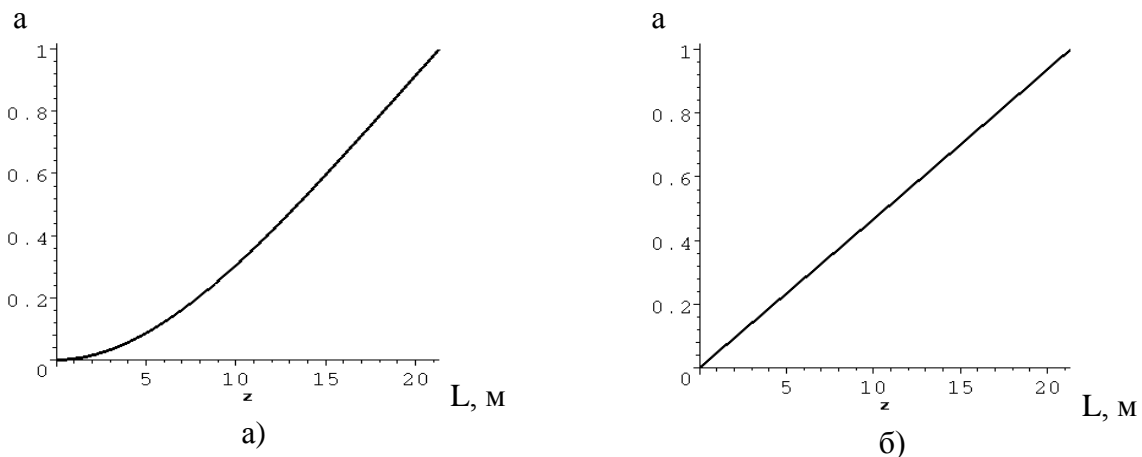


Рис. 2. Поперечний перетин лопаті вітрової турбіни

Результати чисельних розрахунків форм коливань вітрової турбіни наведено на рис. 3.



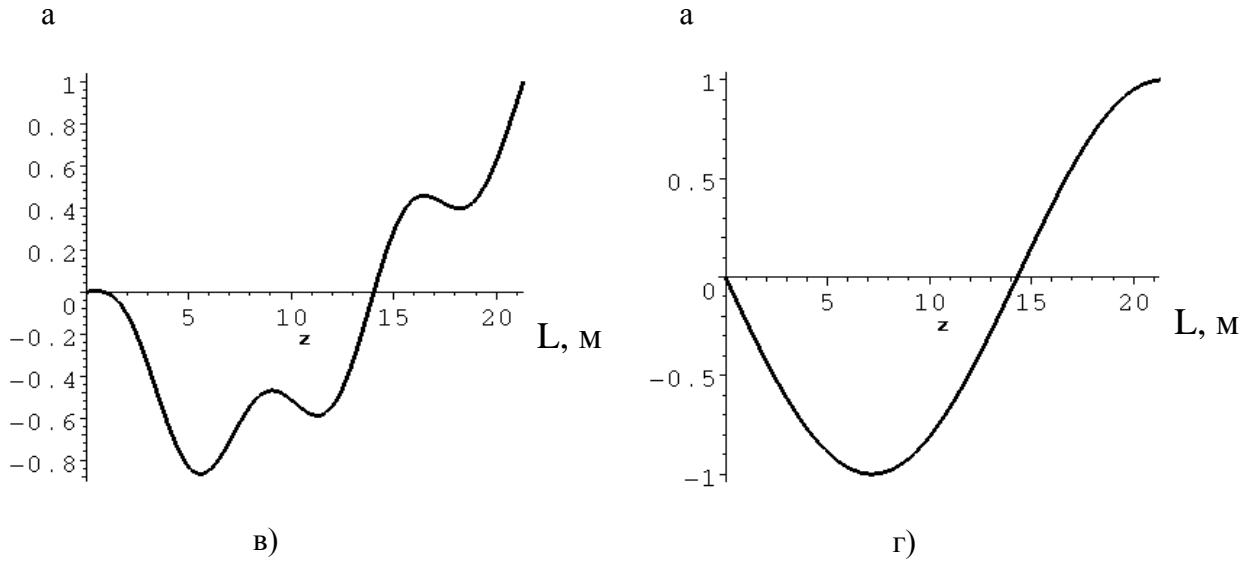


Рис. 3. Власні форми коливань лопаті вітрової турбіни
(а, в - згинні коливання W ; б, г - крутильні коливання θ_x)

Отримані в роботі форми згинно-крутильних коливань, які використовуються в аналізі нелінійних коливань лопаток та лопатей турбін, є пов'язаними вже у лінійному наближенні.

У **третьому** розділі дисертаційної роботи для досліджень нелінійних згинно-згинно-крутильних коливань закручених стрижнів, що обертаються, здійснено перехід від рівнянь в частинних похідних до системи з кінцевим числом ступенів свободи за допомогою методу Бубнова-Гальоркіна. Згинно-згинно-крутильні коливання розкладаються по власних формах лінійних коливань:

$$W(x,t) = \sum_{v=1}^{N_1} q_v W_v(x); \quad \theta_x(x,t) = \sum_{v=1}^{N_2} q_{v+N_1} \theta_v(x); \quad V(x,t) = \sum_{v=1}^{N_3} q_{N_1+N_2+v} V_v(x), \quad (3)$$

де W_v , V_v - власні форми згинних коливань, θ_v - власні форми крутильних коливань, q - переміщення.

Нелінійні коливання стрижня описуються системою з $N_1 + N_2 + N_3$ ступенями свободи

$$(M)\ddot{q} + (K)q + \Omega F(q, \dot{q}) + \Phi(q) + F_0 = 0, \quad (4)$$

де M - матриця мас, K - матриця жорсткості, $\Omega F(q, \dot{q})$ - доданки, що описують нелінійні сили інерції, які зв'язані із прискоренням Коріоліса, $\Phi(q)$ - доданки, що характеризують геометричну нелінійність стрижня.

Досліджуються коливання стрижня з помірними амплітудами біля положення статичної рівноваги, яке визначається так:

$$\bar{W} = q_1^{(0)} W_1(x); \quad \bar{\theta}_x = q_8^{(0)} \theta_1(x); \quad \bar{V} = q_{15}^{(0)} V_1(x).$$

Значення параметрів $q_1^{(0)}$, $q_8^{(0)}$, $q_{15}^{(0)}$ одержується з наступної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$K_{1,1} q_1^{(0)} + K_{1,15} q_{15}^{(0)} + \Omega^2 R_1^{(1)} q_1^{(0)} + \Omega^2 R_8^{(1)} q_8^{(0)} + A_{8,15}^{(1)} q_8^{(0)} q_{15}^{(0)} + A_{8,1}^{(1)} q_8^{(0)} q_1^{(0)} = 0;$$

$$K_{8,8}q_8^{(0)} + \Omega^2 R_1^{(8)}q_1^{(0)} + \Omega^2 R_{15}^{(8)}q_{15}^{(0)} + \Omega^2 C_8 + A_{11}^{(8)}q_1^{(0)2} + A_{15,15}^{(8)}q_{15}^{(0)2} + A_{15,1}^{(8)}q_{15}^{(0)}q_1^{(0)} = 0;$$

$$K_{15,1}q_1^{(0)} + K_{15,15}q_{15}^{(0)} + \Omega^2 R_8^{(15)}q_8^{(0)} + \Omega^2 R_{15}^{(15)}q_{15}^{(0)} + A_{8,1}^{(15)}q_8^{(0)}q_1^{(0)} + A_{8,15}^{(15)}q_8^{(0)}q_{15}^{(0)} = 0. \quad (5)$$

Для дослідження коливань стрижня з помірними амплітудами вводиться наступна заміна змінних: $q_i = \theta_i + q_i^{(0)}$. Тоді коливання стрижня при геометрично нелінійному деформуванні описуються наступною нелінійною динамічною системою

$$(M)\ddot{\theta} + (K)\theta + \Omega(G)\dot{\theta} + \Omega F(\theta, \dot{\theta}) + \Phi(\theta) = 0. \quad (6)$$

Четвертий розділ роботи присвячено дослідженню нелінійних коливань закручених стрижнів, що обертаються, за допомогою методу нелінійних нормальних форм Шоу-П'єра. Суть методу полягає в тому, що усі фазові змінні виражаються через дві найбільш активні фазові координати. Тому система з довільним числом ступенів свободи замінюється системою з одним ступенем свободи.

Динамічна система (6) наводиться до модальних координат та має наступний вигляд

$$\ddot{h} + (P)h + \Omega Q(h, \dot{h}) + \tilde{\Pi}(h) = 0, \quad (7)$$

де $(P) = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots)$ – матриця частот.

Нелінійні нормальні форми коливань (інваріантні різноманіття) представляються як степеневі ряди:

$$h_i = \Phi_i(h_k, g_k) = a_{1,i}^{(k)}h_k + a_{2,i}^{(k)}g_k + a_{3,i}^{(k)}h_k^2 + a_{4,i}^{(k)}h_k g_k + a_{5,i}^{(k)}g_k^2 + a_{6,i}^{(k)}h_k^3 +$$

$$+ a_{7,i}^{(k)}h_k^2 g_k + a_{8,i}^{(k)}h_k g_k^2 + a_{9,i}^{(k)}g_k^3 + \dots;$$

$$g_i = S_i(h_k, g_k) = b_{1,i}^{(k)}h_k + b_{2,i}^{(k)}g_k + b_{3,i}^{(k)}h_k^2 + b_{4,i}^{(k)}h_k g_k + b_{5,i}^{(k)}g_k^2 + b_{6,i}^{(k)}h_k^3 +$$

$$+ b_{7,i}^{(k)}h_k^2 g_k + b_{8,i}^{(k)}h_k g_k^2 + b_{9,i}^{(k)}g_k^3 + \dots; \quad i = \overline{1,16}; i \neq k, \quad (8)$$

де h_k - переміщення, $g_k = \dot{h}_k$ - швидкості.

Для знаходження коефіцієнтів розкладень (8) отримано систему рівнянь в частинних похідних, яка описує рухи на інваріантних різноманіттях:

$$s_i(h_k, g_k) = \frac{\partial \Phi_i}{\partial h_k} g_k + \frac{\partial \Phi_i}{\partial g_k} \left[-p_k^2 h_k - \Omega Q_k(h, g) - \Pi_k(h) \right];$$

$$p_i^2 \Phi_i(h_k, g_k) + \Omega Q_i(h, g) + \Pi_i(h) = -\frac{\partial S_i}{\partial h_k} g_k + \frac{\partial S_i}{\partial g_k} \left[p_k^2 h_k + \Omega Q_k(h, g) + \Pi_k(h) \right], \quad (9)$$

де $i = \overline{1,16}; i \neq k$.

Для розв'язку системи рівнянь в частинних похідних (9) розкладання (8) вводяться у (9) та прирівнюються коефіцієнти при однакових ступенях h_k, g_k , внаслідок чого отримано систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів $a_{1,i}^{(k)}, a_{2,i}^{(k)}, \dots$. Розв'язок одержаної системи визначає нелінійну нормальну форму коливань (8).

Для дослідження рухів на інваріантних різноманіттях розглядалося k - те рівняння системи (7). Після введення в нього нелінійної нормальної форми

коливань, та врахування, що коливання стрижня є слабо-нелінійними, одержується наступна система з одним ступенем свободи

$$\ddot{h}_k + p_k^2 h_k + \varepsilon \left[\bar{H}_{kk}^{(k)} h_k^2 + \Omega \bar{\Gamma}_{kk}^{(k)} h_k \dot{h}_k + \bar{P}_{3,0} h_k^3 + \bar{P}_{0,3} \dot{h}_k^3 + \bar{P}_{1,2} h_k \dot{h}_k^2 + \bar{P}_{2,1} \dot{h}_k h_k^2 \right] = 0. \quad (10)$$

Для дослідження системи (10) використано метод багатьох масштабів. Як приклад, на рис.4 представлено поверхні нелінійних нормальних форм.

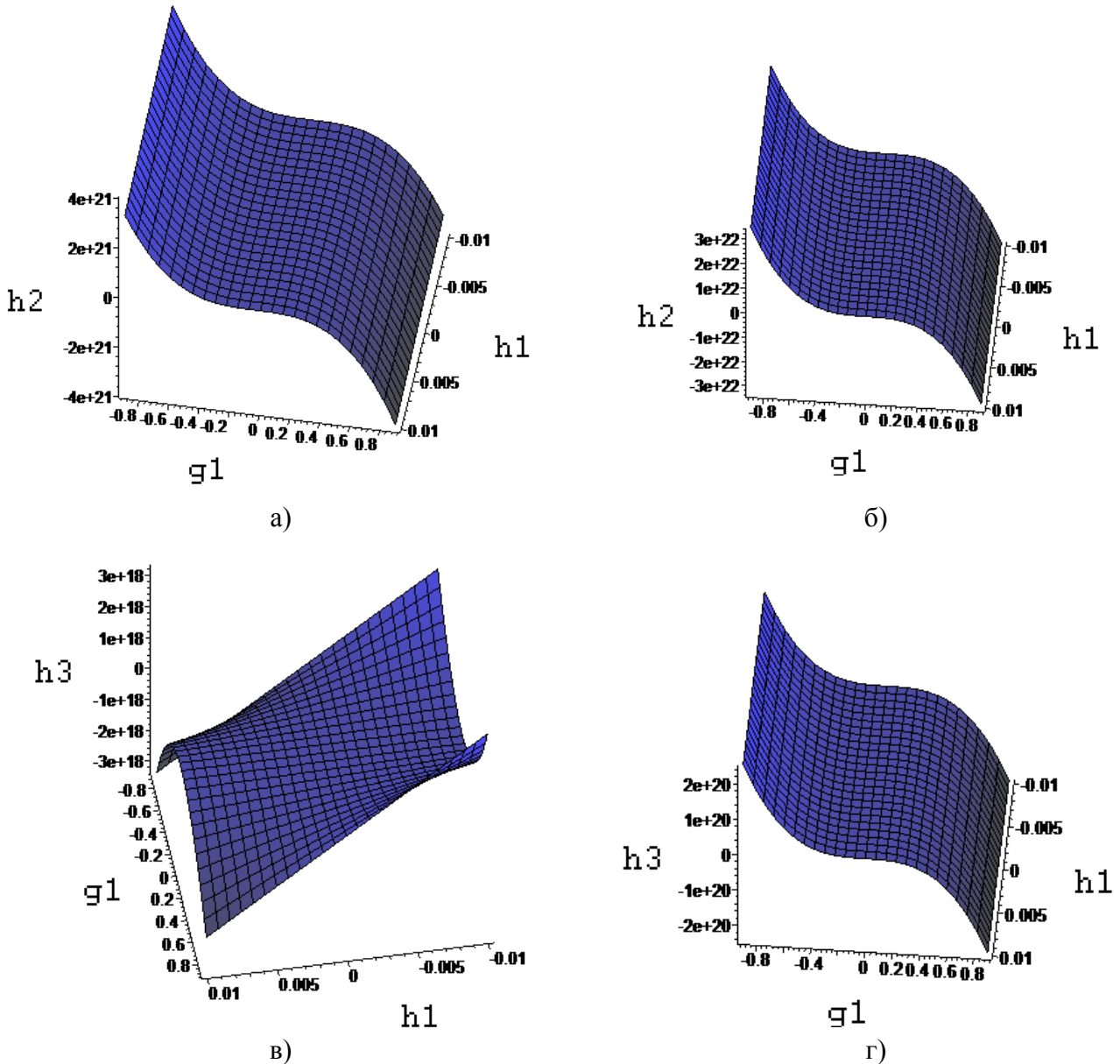


Рис. 4. Поверхні нелінійних нормальних форм

На рис. 5 представлено скелетні криві нелінійних коливань закрученого стрижня, що обертається, на прикладі лопаті вітрової турбіни. В ході розрахунків виявилось, що характер скелетних кривих різний. М'який характер кривих означає, що в поведінку системи більший вклад вносить нелінійна інерційність, а жорсткий характер - нелінійна кривизна.

Таким чином відмічено, що спільне застосування методу нелінійних нормальних форм і методу багатьох масштабів надзвичайно ефективно,

оскільки це дозволяє досліджувати аналітично скелетні криві в динамічних моделях закручених стрижнів великої розмірності.

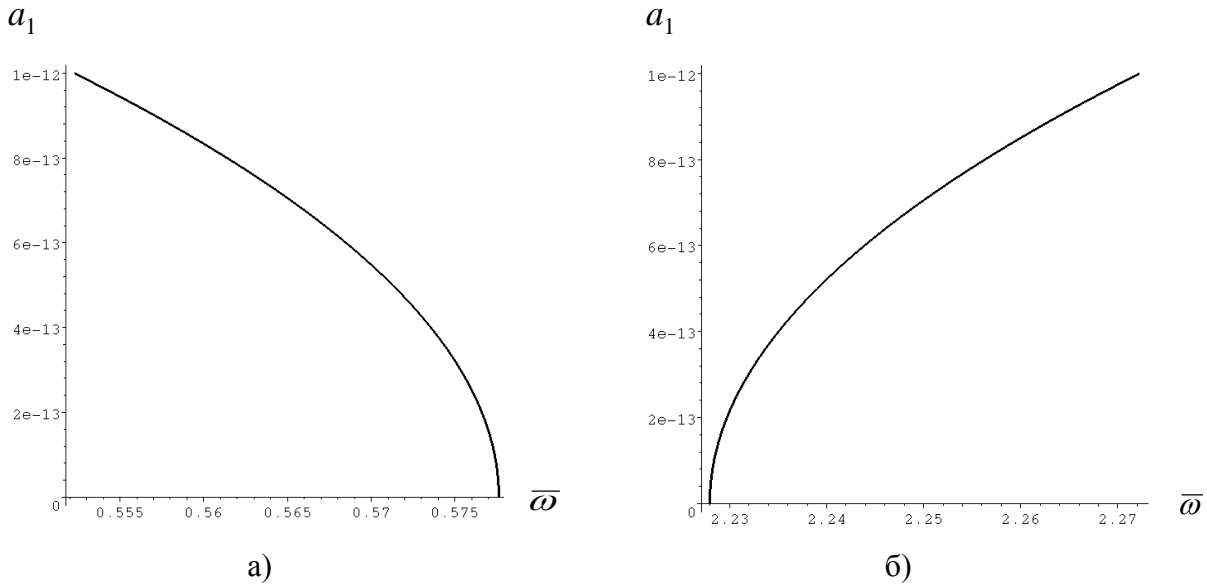


Рис. 5. Скелетні криві нелінійних коливань

В п'ятому розділі дисертаційної роботи для визначення ресурсу лопаток турбін використовується підхід континуальної механіки пошкоджуваності, де для оцінки втомного руйнування використовується гіпотеза ізотропії накопичення пошкоджуваності. Узагальнене кінетичне рівняння для параметра пошкоджуваності D прийнято у вигляді

$$\frac{dD}{dN} = \frac{F\sigma_e^k}{(1-D)^k}, \quad (11)$$

де $\sigma_e = \tau_{oct}^a + 3v\bar{\sigma}$; τ_{oct}^a та $\bar{\sigma}$ - еквівалентні напруження, які визначають руйнування при накопиченні втомного пошкодження та статичному навантаженні відповідно; F , k , v - константи матеріалу.

Інтегруванням рівняння (11) можна одержати поточне значення параметра пошкоджуваності залежно від числа циклів навантаження. Як критерій порівняння режимів навантаження та властивостей матеріалів, з яких виготовлено лопатки, використовується значення граничного числа циклів до моменту закінчення прихованого пошкодження

$$N_* = \frac{1}{F\sigma_e^k(k+1)}. \quad (12)$$

Використовуючи експериментальні криві втомної міцності для двох рівнів напружень σ_1 та σ_2 , при яких втомне руйнування відбувається за N_1 та N_2 циклів відповідно, за допомогою рівняння (12), отримано значення констант F і k , що входять до кінетичного рівняння для параметру пошкоджуваності (11):

$$k = \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) / \ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right), \quad F = \frac{1}{(k+1)N_1(\sigma_1)^k}. \quad (13)$$

В роботі виконано оцінювання довговічності лопатки третього ступеня циліндра низького тиску потужної парової турбіни К - 300-240.

Дослідження проводились у три етапи: 1) аналіз нелінійних вільних згинно-згинно-крутильних коливань лопаток, які моделюються закрученими стрижнями; 2) розрахунки вимушених коливань лопатки із застосуванням методу гармонійного балансу; 3) визначення напружено-деформованого стану із застосуванням результатів розрахунків вимушених коливань лопаток та значень числа циклів до руйнування для експлуатаційного режиму роботи турбіни.

Проводились розрахунки вільних коливань робочої лопатки 3-го ступеню парової турбіни. Для цих розрахунків застосовано метод нелінійних нормальних форм в поєднанні з методом гармонійного балансу. Результати розрахунків наведено на рис. 6.

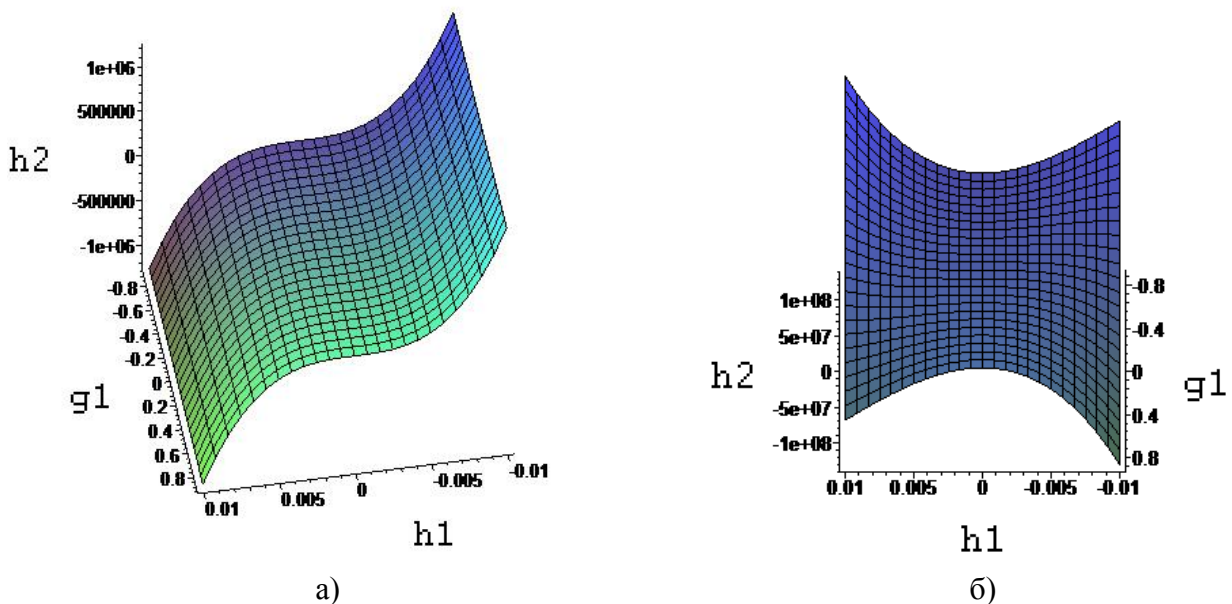


Рис. 6. Поверхні нелінійних нормальних форм робочої лопатки 3-го ступеню парової турбіни

Для дослідження вимушених коливань лопатки застосовано метод Раушера. Для опису коливань лопатки використано модель з одним ступенем свободи

$$\ddot{h}_1 + p_1^2 h_1 + \tilde{H}_{11}^{(\mu)} h_1^2 = \Gamma_{\mu\nu} f_{11} \gamma \cos \Omega t.$$

Застосовуючи метод гармонійного балансу, коливання лопатки представлено у вигляді

$$h = A_0 + A_1 \cos \Omega t + A_2 \cos 2\Omega t.$$

В результаті отримано систему 3-х нелінійних рівнянь відносно амплітуд, за розв'язком якої чисельно визначено амплітудно-частотну характеристику лопатки поблизу першої власної частоти (рис. 7).

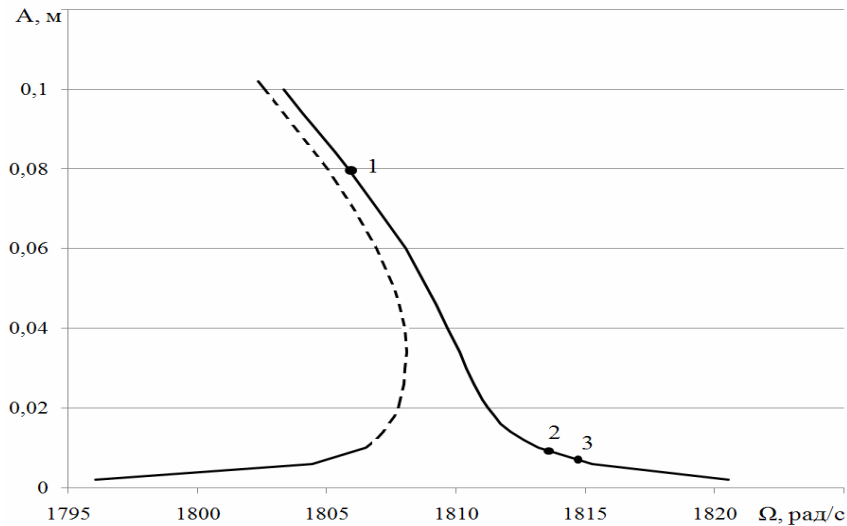


Рис. 7. Амплітудно-частотна характеристика лопатки поблизу першої власної частоти

Розв'язок задачі вимушених коливань використано для визначення компонент тензора амплітудних напружень. З використанням скінченно-елементного програмного комплексу виконано розрахунки полів напружень, що виникають при вимушених коливаннях, для різних значень переміщень краю лопатки.

Результати розрахунків втомної довговічності лопаток з різних матеріалів при різних експлуатаційних температурах наведено в таблиці 1. Розглянуто по два значення амплітудних напружень, рівних 516.2 МПа та 392.7 МПа, які відповідають амплітудам стійких коливань 0.008 м і 0.006 м. Статична складова еквівалентних напружень визначалась за даними розрахунку лопатки під дією тиску пару.

Таблиця 1

Характеристики втомної міцності лопаток 3-ї ступені ЦНД потужної парової турбіни типу К- 300-240

Матеріал (сталь)	Т, К	Еквівалентне напруження МПа	Число циклів до руйнування
12X13 (1X13), 403 US	423	392.7	$7.62 \cdot 10^8$
		516.2	$2.95 \cdot 10^6$
12X13 (1X13), 403 US	723	392.7	$2.42 \cdot 10^5$
		516.2	-
322 US (зістарена та загартована)	423	392.7	$3.32 \cdot 10^{10}$
		516.2	$4.08 \cdot 10^8$
450 US	423	392.7	$2.65 \cdot 10^9$
		516.2	$1.03 \cdot 10^7$
ЭИ437Б	973	392.7	$1.07 \cdot 10^7$
		516.2	$4.24 \cdot 10^5$

Аналіз результатів показує, що лопатки, які виготовлено з сталі марки 322, відповідають вимогам проектування, оскільки число циклів до руйнування перевищує стандартну величину для граничного числа циклів - $2 \cdot 10^7$. Для режиму з меншою амплітудою вимушених коливань при середній робочій температурі $T=423\text{K}$ лопатки, виготовлені зі сталі марки 12X13 (1X13) або сталі 450 (стандарт США), також забезпечують необхідну довговічність.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє отримати оцінки довготривалої міцності лопаток турбомашин із використанням результатів розрахунків їхніх нелінійних вільних та вимушених коливань.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі створено нові методи для оцінювання нелінійних коливань і ресурсу лопаток енергетичних машин; розв'язано прикладні задачі коливань лопатей та лопаток вітрових та парових турбін.

1. Проведено аналіз існуючих сучасних моделей і розрахункових методів оцінювання нелінійних коливань і довговічності лопаток та лопатей турбін, який показав, що вони потребують подальшого розвитку.

2. Створено нові континуальні та дискретні моделі, що описують нелінійні коливання закручених стрижнів, центри тяжіння та жорсткості поперечних перетинів яких не співпадають, що дозволило одержати нелінійні диференціальні рівняння руху закручених стрижнів та запропонувати нові ефективні методи їх розв'язування, а саме: для розрахунку амплітудно-частотної характеристики вимушених коливань робочої лопатки парової турбіни застосовано метод гармонійного балансу; нелінійні коливання лопатей вітрової турбіни досліджувалися за допомогою методу багатьох масштабів та методу нелінійних нормальних форм Шоу-П'єра.

3. На підставі сумісного застосування методу нелінійних нормальних форм Шоу-П'єра та методу багатьох масштабів досліджено нелінійні коливання закручених стрижнів. Це дозволило ефективно досліджувати на аналітичному рівні скелетні криві у динамічних моделях закручених стрижнів великої розмірності.

4. Отримано закономірності та аналітичні співвідношення, що описують скелетні криві лопаті вітроенергетичної установки та лопатки турбіни, по яких встановлено режими коливань з жорсткими та м'якими скелетними кривими. Встановлено, що в першому випадку в моделі нелінійної поведінки переважають доданки, що описують нелінійну кривизну, а в другому – нелінійну інерційність.

5. Надано розрахункові оцінки кількості циклів до руйнування робочих лопаток циліндру низького тиску парової турбіни при вимушених нелінійних коливаннях на основі запропонованого методу сумісного застосування розв'язків задач нелінійних коливань для отримання еквівалентних напружень та інтегрування кінетичного рівняння втомної пошкоджуваності.

6. Результати порівняльного аналізу втомної довговічності лопаток, що виконані в роботі, отримані при цьому висновки та рекомендації використано у ВАТ "Турбоатом" (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ширяева Н.В. Нелинейные изгибно-продольные колебания вращающихся стержней / К.В. Аврамов, Н.В. Ширяева // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 47. – С. 180-184.

Здобувачу належить виведення диференціальних рівнянь нелінійних коливань стрижнів, що обертаються, та аналіз лінійних коливань отриманої системи.

2. Ширяева Н.В. Уравнения нелинейных изгибно-изгибно-крутильные колебаний вращающихся стержней произвольного поперечного сечения / К.В. Аврамов, К. Пьер, Н.В. Ширяева // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 1. – С. 8-19.

Здобувачу належить виведення рівнянь руху закручених стрижнів довільного поперечного перетину, що обертаються.

3. Ширяева Н.В. Нелинейные свободные колебания вращающихся закрученных стержней / К.В. Аврамов, Ю.А. Ищук, Л.В. Розова, Н.В. Ширяева // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 21. – С. 7-14.

Здобувачу належить проведення чисельного аналізу нелінійних коливань закручених стрижнів.

4. Ширяева Н.В. Нелинейные нормальные формы колебаний системы с гироскопическими силами / К.В. Аврамов, К. Пьер, Н.В. Ширяева // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: НАН України. – 2006. – № 11 – С. 7-10.

Здобувачу належить проведення аналізу отриманої системи рівнянь руху.

5. Ширяева Н.В. Оценка долговечности лопаток турбомашин с учетом повреждений при нелинейных колебаниях / К.В. Аврамов, Д.В. Бреславский, О.К. Морачковский, Н.В. Ширяева // Проблемы машиностроения. – Харків: ПМАШ ім. А.М. Підгорного НАН України. – 2009. – Т.12, № 2. – С. 56-62.

Здобувачу належить виведення системи рівнянь вимушених коливань, аналіз напружено-деформованого стану робочих лопаток турбомашин та розробка методу оцінки їхньої довговічності.

6. Ширяева Н.В. Нестационарные изгибно-изгибно-продольные колебания ракетносителя с космическим аппаратом / К.В. Аврамов, В.А. Пирог, В.М. Федоров, Т.М. Пересадько, Н.В. Ширяева // Проблемы машиностроения. – Харків: ПМАШ ім. А.М. Підгорного НАН України. – 2011. – Т.14, № 4. – С. 60-64.

Здобувачу належить проведення розрахунків скінченно-елементної моделі ракетносія зі супутником.

7. Ширяева Н.В. Численный анализ нелинейных колебаний лопасти ветровой энергетической установки / Н.В. Ширяева, К.В. Аврамов, Д.В. Бреславский, О.С. Галас // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2012. – № 9. – С. 10-16.

Здобувачу належить виведення рівнянь руху та проведення чисельного аналізу вільних коливань лопаті вітрової турбіни за допомогою методів нелінійних нормальних форм та методу багатьох масштабів.

8. Shyriaieva N. Flexural-flexural-torsional Nonlinear Vibrations of Pre-twisted Rotating Beams with Asymmetric Cross-sections / K. Avramov, C. Pierre, N. Shyriaieva // Journal of Vibration and Control. – USA: Sage Publications. – 2007. – Vol.13, N.4. – P.329-364.

Здобувачу належить побудова та аналіз дискретної моделі нелінійних коливань закручених стрижнів довільного поперечного перетину.

9. Shyriaieva N. V. Non-linear equations of flexural-flexural-torsional nonlinear oscillations of rotating beams with arbitrary cross section / K. Avramov, C. Pierre, N. Shyriaieva // Международный научный журнал «Прикладная механика». – Київ: Інститут механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України. –2008. – Т.44, № 5. – С.123-132.

Здобувачу належить застосування методу нелінійних нормальних форм до аналізу нелінійних коливань стрижневих елементів енергетичних машин.

10. Ширяєва Н.В. Фізично-нелінійні коливання стержнів / Н.В. Ширяєва // Шоста Всеукраїнська студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики, 17-18 квітня, 2003р.: тези доп. – Львів, ЛНУ, 2003. – С. 69.

Здобувачу належить вивід рівнянь руху та аналіз вільних та вимушених коливань за допомогою асимптотичних методів (метод скінчених різниць та послідовних наближень).

11. Ширяєва Н.В. Ползучесть элементов конструкций при статическом и циклическом нагружении / Д.В. Бреславский, Д.В. Карабут, О.А. Уварова, Н.В. Ширяева // 8-я Международная научно-техническая конференция, 9-10 декабря 2003г.: тезисы докл. - Харьков, ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 299-302.

Здобувачу належать чисельні розрахунки стрижньових елементів конструкцій при їх динамічному навантаженні.

12. Shyriaieva N.V. Impact and nonlinear vibrations of beams and plates / D.V. Breslavsky, A.V. Onyshchenko // The International Conference Nonlinear Dynamics, September 14-16, 2004y: proc. – Kharkiv, 2004. – P. 44-47.

Здобувачу належать виведення та аналіз рівнянь нелінійних коливань стрижнів.

13. Ширяева Н.В. Совместное применение теории нелинейных нормальных форм колебаний и асимптотических методов для моделирования механических систем / К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин, К. Пьер, Н.В. Ширяева, О.С. Галас, И.Д. Бреславский // Одинадцята міжнародна наукова конференція імені академіка М. Кравчука, 18-20 травня, Київ, 2006. – С. 15.

Здобувачу належить аналіз коливань за допомогою чисельних та асимптотичних методів.

14. Shyriaieva N. Flexural-flexural-torsional nonlinear oscillations of pre-twisted rotating beams with asymmetrical cross section / K.V. Avramov, C. Pierre, N. Shyriaieva, O. Galas // Міжнародна конференція “Актуальні проблеми прикладної математики та механіки”: тези доп. – Харків, 2006. – С. 105.

Здобувачу належить аналіз вільних коливань стрижневих елементів машин

15. Ширяева Н.В. Изгибно-изгибно-крутильные колебания закрученных вращающихся стержней переменного поперечного сечения/ К.В. Аврамов, Н.В. Ширяева, О.С. Галас // 14-та Міжнародна наукова конференція вчених України, Білорусі, Росії, 11-15 вересня, 2006р.: тези доп. – Севастополь, 2006. – С. 67-70.

Здобувачу належать чисельні розрахунки геометричних характеристик стрижнів довільного поперечного перетину

16. Ширяева Н.В. Модели изгибно-изгибно-крутильных колебаний лопастей вертолетов в аварийных ситуациях/ К.В. Аврамов, Н.В. Ширяева, О.С. Галас // V міжвузівська науково-практична конференція “Можливості використання методів механіки для розв’язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій”: тези доп. – Харків, 2006. – С. 10-11.

Здобувачу належить чисельний аналіз отриманої моделі коливань за допомогою асимптотичних методів.

17. Shyriaieva N. Nonlinear oscillations of pre-twisted rotating beams with asymmetrical cross section/ K. Avramov, C. Pierre, O. Morachkovski, N. Shyriaieva, O. Galas // 9th Conference on Dynamical systems - Theory and Application: proc. – Lodz, 2007. – P. 77-84.

Здобувачу належить методика та алгоритм урахування розбіжності центрів тяжіння та жорсткості в моделі коливань стрижнів.

18. Shyriaieva N. Nonlinear flexural-flexural-torsional vibrations of rotating beams/ K. Avramov, C. Pierre, O. Morachkovski, N. Shyriaieva, O. Galas // Третя Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні”, 29-31 травня, 2007р.: тези доп. – Київ, 2007. – С. 221-223.

Здобувачу належить аналіз вільних коливань закручених стрижнів довільного поперечного перетину.

19. Shyriaieva N. Flexural-flexural-torsional nonlinear vibrations of pre-twisted rotating beams with asymmetric cross section/ K.V. Avramov, O.K. Morachkovski, C. Pierre, O. Galas, N. Shyriaieva // The Second International Conference Nonlinear Dynamics, September 25-28, 2007y: proc. – Kharkiv, 2007. – P. 17-21.

Здобувачу належить методика урахування геометричної нелінійності в моделі коливань та проведення чисельних розрахунків вільних коливань за допомогою асимптотичних методів.

20. Shyriaieva Natalia. Flexural-flexural-torsional nonlinear vibrations of pre-twisted rotating beams / Konsantin V. Avramov, Oleg K. Morachkovski, Christophe

Pierre, Oleg Galas, Natalia Shyriaieva // Nonlinear Dynamics of Composite and Smart Structures, Euromech Colloquium 498: proc. – Lublin, 2008. – P.76-81.

Здобувачу належить аналіз нелінійних коливань закручених стрижнів, за допомогою методів нелінійних нормальних форм та багатьох масштабів.

21. Shyriaieva N. Nonlinear vibrations and long-term strength of turbine blades / D. Breslavsky, O. Morachkovsky, N. Shyriaieva // The Third International Conference Nonlinear Dynamics, September 22-24, 2010y: proc. – Kharkiv, 2010. – P. 272-277.

Здобувачу належить аналіз напружено-деформованого стану лопаток турбомашин та розрахунки числа циклів до руйнування.

АНОТАЦІЇ

Ширяєва Н.В. Розробка методів розрахунку нелінійних коливань та довговічності лопатей та лопаток парових і вітрових турбін. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2013.

У дисертаційній роботі створено метод аналізу нелінійних коливань стрижневих елементів машинобудівних конструкцій для оцінки їхньої довговічності. Для дослідження нелінійних коливань закручених стрижнів отримано нелінійну динамічну систему великої розмірності за допомогою методу Бубнова-Гальоркіна.

За допомогою спільного застосування методу нелінійних нормальних форм Шоу-П'єра та методу багатьох масштабів одержано м'які та жорсткі скелетні криві, що описують вільні коливання закручених стрижнів.

Запропоновано метод оцінки довговічності та прогнозування ресурсу лопаток парових турбін, що здійснюють коливання з великими амплітудами. По фізико-механічних характеристиках втомної міцності сталей виконано розрахунки пошкоджуваності в лопатках парової турбіни типу К-300-240 при складному напруженому стані та визначено граничні значення числа циклів до руйнування. Надано рекомендації з вибору матеріалу для виготовлення лопаток.

Ключові слова: закручені стрижні, лопатки парових та лопаті вітрових турбін, нелінійні коливання, нелінійні нормальні форми, інваріантні різноманіття, довговічність.

Ширяева Н.В. Разработка методов расчета нелинейных колебаний и долговечности лопастей и лопаток паровых и ветряных турбин. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный

технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2013.

В диссертационной работе создан метод анализа нелинейных колебаний стержневых элементов машиностроительных конструкций для оценки их долговечности. Модель нелинейных изгибно-изгибно-крутильных колебаний закрученных стержней получена в предположении, что центр тяжести поперечного сечения и центр жесткости не совпадают. Модель колебаний представляется системой трех связанных нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных. Получены аналитические формы изгибно-крутильных колебаний, которые используются в анализе нелинейных колебаний системы.

Получена нелинейная динамическая система большой размерности, описывающая изгибно-изгибно-крутильные колебания закрученного стержня с помощью метода Бубнова-Галеркина. Исследованы состояния статического равновесия вращающегося закрученного стержня под действием центробежных сил. Установлено, что под действием центробежных сил закрученный стержень растягивается и раскручивается. Сделан вывод о том, что учет геометрической нелинейности практически не влияет на величину статического равновесия вращающегося закрученного стержня.

Получило дальнейшее развитие совместное применение метода нелинейных нормальных форм Шоу-Пьера и метода многих масштабов для исследования нелинейных колебаний закрученных стержней. Получены мягкие и жесткие скелетные кривые, описывающие свободные колебания лопаток и лопастей турбин. Установлено, что для лопасти ветровой турбины первая, третья, пятая и шестая скелетные кривые являются мягкими, а вторая, четвертая и седьмая – жесткими. Показано, что преобладание нелинейной инерционности в поведении системы смягчает скелетную кривую, а нелинейной кривизны – ужесточает.

Предложен метод оценки долговечности и прогнозирования ресурса лопаток паровых турбин, совершающих нелинейные колебания. Выполнен анализ нелинейных колебаний и расчеты напряженно-деформированного состояния лопаток паровой турбины типа К-300-240 от действия статических и динамических нагрузок.

Решение задачи вынужденных колебаний использовано для определения компонент тензора эквивалентных напряжений при варьировании значений перемещений края лопатки. Выполнены расчеты полей напряжений, возникающих при вынужденных колебаниях для характерных значений перемещений края лопатки.

По физико-механическим характеристикам усталостной прочности сталей, применяемых для изготовления лопаток турбин, с помощью кинетического уравнения для параметра повреждаемости при сложном напряженном состоянии выполнены расчеты числа циклов до разрушения лопатки. Сформулированы рекомендации по выбору материала лопаток.

Ключевые слова: закрученные стержни, лопадки паровых и ветровых турбин, нелинейные колебания, нелинейные нормальные формы, долговечность.

Shyriaieva N.V. Development of calculation methods of nonlinear vibrations and durability of steam and wind turbine blades. – With manuscript rights.

The PhD. thesis in the field of technical sciences for specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2013.

In dissertation work the method of the nonlinear vibrations analysis of beams elements in mechanical engineering structures for the estimation of their life is developed. For nonlinear vibration analysis the nonlinear dynamic system of large dimension was derived by use of Galerkin method.

With the joint use of Shaw-Pierre nonlinear normal modes and multiple scales methods the soft and hard backbone curves of the free vibrations of pre-twisted beams are carried out.

The method of long term strength assessment and resource predicting of steam turbine blades that oscillate with large amplitudes is suggested. The blades steam turbine K-300-240 are investigated. The calculations of blades' damage under complex stress state were made with the help of physical and mechanical characteristics of steels fatigue strength. The critical values of the number of cycles to failure were calculated. The recommendations on the choice of material for production of blades are provided.

Key words: pre-twisted beams, steam and wind turbine blades, nonlinear vibrations, nonlinear normal modes, invariant manifolds, service life.



Ширяєва Наталя Володимирівна

Розробка методів розрахунку нелінійних коливань та довговічності лопатей та лопаток парових і вітрових турбін

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
к.т.н., доц. Шипуліна Л.В.

Підписано до друку 23.04.2013 р. Формат 60x90 1/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 030370

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16